فصلنامه علمی ـ پژوهشی مطالعات مدیریت صنعتی سال نهم، شماره ۲۳، زمستان ۹۰
صفحات ۲۰۹ تا ۲۳۱

ارائه رویکردی جدید در حل مسئله تشکیل سلولی با در نظر گرفتن مسیرهای تولیدی جایگزین

پیام چینی‌فروشان*
بهروز پور قناد **
نرگس شهرکی ***

چکیده

در این مقاله مدل ریاضی جدیدی به منظور حل مسئله تشکیل سلولی با وجود مسیرهای تولیدی جایگزین در حالی که امکان تولید روی بیش از یک مسیرتولیدی وجود دارد، ارائه شده است. تابع هدف مدل پیشنهادی کاهش جابجایی‌های بین سلولی با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و فاکتورهای تولیدی کاربردی می‌باشد. به منظور افزایش انعطاف‌پذیری حاصل از مسیرهای جایگزین، مدل ارائه شده تقاضای قطعات را روی مسیرهای مختلف توزیع می‌کند. به علاوه، توازن بار کاری ماشین‌آلات به صورت یک محدودیت خطی در مدل لحاظ شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله و ماهیت بهینه‌سازی ترکیباتی مدل، الگوریتم ترکیبی متشکل از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای حل آن ارائه شده است. الگوریتم

* دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران (مسئول مکاتبات)p.chiniforooshan@usc.ac.ir
** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
*** دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۸۹/۵/۹ تاریخ پذیرش: ۹۰/٤/۲۵

پیشنهادی روی ۱۰ مسئله نمونه با استفاده از دو الگوریتم موجود در ادبیات مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج محاسباتی کارایی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در یافتن جواب و همچنین برتری رویکرد پیشنهادی نسبت به رویکرهای پیشین که تنها یک مسیر را از میان مسیرهای تولیدی انتخاب می‌کنند را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: سیستم تولید سلولی، تشکیل سلولی، مسیرهای تولیدی جایگزین، الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی خطی

مقدمه

سیستم تولید سلولی کاربردی از فلسفه تکنولوژی گروهی در زمینه ساخت و تولید است. اساس این سیستم تفکیک مجموعه تسهیلات تولیدی به چندین گروه از ماشین آلات (سلول) می‌باشد، که هر کدام از آنها یک خانواده قطعه را تولید می‌کند. تولید سلولی یک رویکرد تولیدی با هدف افزایش کارایی تولید و انعطاف‌پذیری سیستم جهت پاسخ گویی به نیاز صنعت از طریق به کارگیری تشابه قطعات است. از ویژگیهای یک سلول تولیدی ایده آل این است که تمامی قطعات هر خانواده قطعه در یک سلول انجام شده و سلولها کاملا مستقل از یکدیگر (بدون جابجایی بین سلولی) باشند و همچنین خانواده قطعه (قطعات) اختصاص یافته به یک سلول از تمامی ماشین‌آلات آن سلول تولیدی استفاده کنند.

مزایای حاصل از پیاده سازی سیستم تولید سلولی در مقالات بسیاری اشاره شده که از جمله آنها می‌توان به کاهش زمان آماده سازی قطعات، کاهش موجودی در جریان ساخت، کاهش هزینه و زمان جابجایی مواد و بهبود برنامه‌ریزی تولید اشاره کرد [۱۵،۱۹]. با وجود تمام مزایای حاصل این سیستم، تخصیص ماشین‌آلات تولیدی به سلول‌ها باعث ایجاد یک عدم توازن بار کاری روی ماشین‌آلات در سیستم تولیدی می‌شود [۹]. جنسن و همکاران و همچنین آدنسودیاز و همکاران استفاده از مسیرهای تولیدی جایگزین را به عنوان راه حل مؤثری برای رفع این مشکل ارائه دادند [۱،۷].

تشکیل خانواده قطعات بر اساس تشابهات در طراحی یا مشخصات ساخت یکسان، و گروه بندی ماشین‌آلاتی که این قطعات را پردازش خواهد کرد تشکیل سلولی نامیده می‌شود. مسئله تشکیل سلولی مهمترین و کلیدی ترین گام در طراحی سیستم تولید سلولی به شمار می‌رود. در طول سه دهه اخیر تحقیقات بسیار زیادی روی این مسئله انجام شده و روش‌ها و رویکردهای بسیاری برای حل این مسئله ارائه شده است. مروری جامع در زمینه مسئله تشکیل سلولی را می‌توان در مقالات [۱۱، ۱۴،۱۵] یافت.

مروری بر ادبیات مسئله تشکیل سلولی نشان می‌دهد که در اکثر روش‌های ارائه شده برای این مسئله فرض می‌شود که قطعات تنها دارای یک برنامه تولیدی هستند [۲]. این در حالی است که به جهت افزایش سطح انعطاف‌پذیری در محیط‌های تولیدی و همچنین امکان استفاده از ماشین‌آلات مدرن و چندکاره که قادر به انجام عملیات‌های مختلف تولیدی روی قطعات هستند، قابلیت تولید محصولات در مسیرهای تولیدی مختلف وجود دارد [۸]. از نظر تئوریک وجود مسیرهای جایگزین تولیدی، امکان انتخاب از میان مسیرها را فراهم می‌آورد و منجر به افزایش ناحیه شدنی در فضای حل مدل ریاضی متناظر می‌شود. بنابراین در فضای شدنی بزرگتر امکان یافتن جواب بهتر نیز افزایش می‌یابد [۱۳].

اخیراً تحقیقاتی در زمینه مسئله تشکیل سلولی با فرض وجود مسیرهای جایگزین انجام شده که از آن جمله می‌توان به مقالات [۴،۶،۱۶،۲۲] اشاره کرد. در این تحقیقات بدین نکته اشاره شده که با استفاده از انعطاف‌پذیری حاصل از به کارگیری مسیرهای تولید جایگزین مزایایی شامل بهره‌برداری بهتر از ماشین‌آلات، توازن بار کاری بهتر و کاهش در جابجایی‌های بین سلولی بدست آمده است.

با این وجود در تمامی این تحقیقات سعی شده که تنها یک مسیر تولیدی از میان مسیرهای موجود برای هر قطعه با هدف کمینه‌سازی جابجایی‌های بین سلولی انتخاب شود. این امر باعث می‌شود که تنها بخشی از انعطاف‌پذیری حاصل از مسیرهای تولید جایگزین به کار گرفته شود. در این تحقیق نشان داده خواهد شد که امکان تولید روی چند مسیر تولیدی بطور هم زمان می‌تواند باعث افزایش سطح

انعطاف‌پذیری، توازن بهتر بار کاری ماشین‌آلات و دستیابی به جواب‌های بهتر شود. بنابر این هدف از تحقیق حاضر ارائه مدلی جهت فرمول بندی مسئله تشکیل سلولی با در نظر گرفتن مسیرهای تولیدی جایگزین در حالتی که امکان تولید روی بیش از یک مسیر تولیدی وجود دارد، می‌باشد. به علاوه بسیاری از فاکتورهای مهم تولیدی از جمله توالی عملیات، حجم تولید، زمان عملیات، توازن بار کاری ماشین‌آلات، ظرفیت ماشین‌آلات و محدودیت اندازه سلول در مدل لحاظ شده است. با توجه به پیچیدگی محاسباتی بالای مدل پیشنهادی از یک الگوریتم ترکیبی متشکل از الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه‌ریزی خطی (LP) برای حل آن استفاده شده است.
سایر قسمتهای تحقیق بدین صورت سازماندهی شده اند: در فصل دوم کلیات و تعریف مسئله پیشنهادی ارائه شده است. در فصل سوم مدل ریاضی غیرخطی پیشنهادی با تابع هدف کمینه‌سازی جابجایی‌های بین سلولی فرمولبندی شده است. با توجه به پیچیدگی مدل پیشنهادی، الگوریتم ترکیبی جدیدی جهت حل مدل در فصل چهارم توسعه داده شده است. مدل پیشنهادی و الگوریتم حل آن با استفاده از یک مثال عددی در فصل پنجم تشریح شده است. در فصل ششم نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی با دو الگوریتم موجود در ادبیات و با استفاده از ۱۰ مسئله مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. جمع‌بندی تحقیقات انجام شده در فصل هفتم ارائه گردیده است.

تعریف مسئله

مروری بر ادبیات مسئله تشکیل سلولی با فرض وجود مسیرهای جایگزین نشان می‌دهد که در تمامی تحقیقات سعی شده که تنها یک مسیر تولیدی از میان مسیرهای موجود برای هر قطعه با هدف کمینه‌سازی جابجایی‌های بین سلولی انتخاب شود [۸]. زمانی که تنها یک مسیر تولیدی از بین مسیرهای موجود انتخاب می‌شود، مابقی مسیرهای تولیدی کنار گذاشته شده و دیگر در تشکیل سلولی و سایر مراحل طراحی سیستم تولید سلولی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این امر باعث می‌شود که تنها بخشی از انعطاف‌پذیری حاصل از مسیرهای تولید جایگزین به کار

گرفته شود.

با گذشت زمان، اهداف، مفروضات و عوامل تولیدی لحاظ شده در تحقیقات در مورد سیستم تولید سلولی به واقعیت نزدیک‌تر می‌شوند. وو و سالوندی درباره لزوم لحاظ کردن عوامل مختلف تولیدی مانند ظرفیت ماشین‌آلات، توازن بار کاری ماشین‌آلات، توالی عملیات و ... در مراحل طراحی سیستم تولید سلولی تأکید کرده‌اند [۲۱]. در نظر گرفتن عوامل تولیدی باعث واقعی‌تر شدن مسئله و در عین حال افزایش پیچیدگی مسئله می‌شود. توازن بار کاری ماشین‌آلات از جمله مهمترین عوامل و اهداف در طراحی مسئله تشکیل سلولی است. نادیده گرفتن توازن بار کاری روی ماشین‌ها منجر به تأخیرهای طولانی در پردازش قطعات روی ماشین‌آلات با بارکاری سنگین می‌شود. مروری بر ادبیات این مسئله نشان می‌دهد که در اکثر تحقیقات انجام شده، به مسئله ایجاد توازن بار کاری ماشین‌آلات توجه نشده است [۸،۱۴].

سورش و اسلومپ رویه ای را به منظور کمینه‌سازی جابجایی مواد و عدم تعادل بار کاری ماشین‌آلات ارائه دادند، ولی در رویکرد ارائه شده توسط آنها بحث مسیرهای تولید جایگزین لحاظ نشده است [۱۷]. ناير و نارندران و وون و لی الگوریتم‌هایی را برای حل مسئله تشکیل سلولی با در نظر گرفتن توالی عملیات قطعات روی ماشین‌ها و حجم تولید قطعات پیشنهاد دادند [۱۰،۲۰]. اما در الگوریتم‌های ارائه شده توسط آنها فرض شده که برای هر قطعه تنها یک مسیر تولیدی وجود دارد. یین و یاسودا الگوریتم ابتکاری را به منظور لحاظ کردن توالی عملیات و مسیرهای جایگزین ارائه دادند، با این وجود آنها زمان پردازش قطعات و بار کاری ماشین‌آلات را نادیده گرفتند [۲۳].

ژائو و وو الگوریتم ژنتیکی را برای کمینه‌سازی عدم توازن بار کاری ماشین‌آلات و جابجایی‌های بین سلولی توسعه دادند. همچنین بعضی از فاکتورهای مهم تولیدی نظیر توالی عملیات، مسیرهای جایگزین و حجم تولید در مدل پیشنهادی آنها لحاظ شده است [۲۴]. کیم و همکاران در سال ۲۰۰۴ از یک الگوریتم ابتکاری دو مرحله ای برای حل مسئله تشکیل سلولی چند هدفی با هدف

کمینه‌سازی مجموع جابجایی‌های درون سلولی و بیشینه عدم توازن بار کاری استفاده کردند. در این تحقیقات نیز تنها یک مسیر تولیدی انتخاب می‌شود. کیم و همکاران پیشنهاد دادند که با انتخاب چند مسیر تولیدی و امکان تولید همزمان روی چند مسیر تولیدی ممکن است جواب‌هایی با بار کاری متوازن تر بدست آورد [۸]. صفایی و همکاران در سال ۲۰۰۸ مدلی را به منظور طراحی سیستم تولید سلولی در حالت چند دوره‌ای و پویا با وجود مسیرهای تولید جایگزین ارائه دادند و برای حل آن از یک روش شبیه‌سازی آنیلینگ استفاده کردند [۱۱]. بجستانی و همکاران در سال ۲۰۰۹ مسئله تشکیل سلولی با مسیرهای جایگزین را در حالت داینامیک در نظر گرفتند و یک مدل چند هدفه را ارائه دادند. توابع هدف مدل ارائه شده کمینه‌سازی همزمان تغییرات بار کاری درون سلول‌ها و مجموع هزینه‌های مختلف شامل هزینه ماشین‌آلات، هزینه جابجایی مواد در بین سلول‌ها و هزینه جابجایی ماشین‌آلات می‌باشد. با توجه به NP_Complete بودن مسئله ارائه شده، مؤلفین یک الگوریتم جستجوی پراکنده چند هدفه را برای حل مسئله توسعه دادند [۳].

در این تحقیق به منظور ارائه مدلی جامع در مسئله تشکیل سلولی، فاکتورهای تولیدی محدودیت ظرفیت ماشین‌آلات، توالی عملیات، مسیرهای تولیدی جایگزین، توازن بار کاری ماشین‌آلات، حجم تقاضای قطعات و وجود حد بالا برای تعداد ماشین‌های درون یک سلول در نظر گرفته شده اند. به علاوه، در این تحقیق به منظور افزایش انعطاف پذیری در سلول‌های تولیدی و دستیابی به جواب‌های بهتر، امکان تولید روی چند مسیر تولیدی بطور همزمان فراهم شده است.

مدل ریاضی پیشنهادی

در این بخش، مدل ریاضی جهت تشکیل سلول‌های تولیدی و تعیین مقدار تولید هر قطعه در هر مسیر تولیدی توسعه داده شده است. تابع هدف مدل پیشنهادی کمینه‌سازی جابجایی‌های بین سلولی با توجه به برآورده ساختن محدودیت های تقاضای قطعات، ظرفیت سلول و ظرفیت ماشین‌آلات می‌باشد. مدل پیشنهادی قادر است به منظور بهره‌گیری بهتر از انعطاف‌پذیری حاصل از مسیرهای تولید جایگزین،

حجم تولید یک قطعه را روی مسیرهای مختلف توزیع کند.

به علاوه در مدل ریاضی ارائه شده، ایجاد توازن بار کاری روی ماشین‌آلات به صورت یک محدودیت خطی در مدل اعمال شده است. در این محدودیت از فاکتور $q \in (0,1]$ برای تعیین میزان بالانس بار کاری ماشین‌آلات استفاده شده است. این ویژگی این قابلیت را به طراح سیستم می‌دهد تا سطح توازن بار کاری روی ماشین‌آلات را تعیین کند. هدف از ایجاد توازن بار کاری روی ماشین‌ها تخصیص قطعات در مسیرهای تولیدی آنها است به نحوی که میزان بار کاری روی ماشین‌آلات و زمان استفاده از آنها به طور یکنواخت باشد. مدل ریاضی پیشنهادی برای مسئله تشکیل سلولی با ویژگیها و مشخصات تعریف شده بر اساس متغیرها و پارامترهای زیر بدین صورت فرمول‌بندی می‌شود:

پارامترهای ورودی

M تعداد ماشین‌آلات

N تعداد قطعات

C تعداد سلول‌های تولیدی

V_i حجم تقاضای قطعه i $(\forall i = 1,2,...,N)$

Q_i تعداد مسیرهای تولیدی موجود برای قطعه i $(\forall i = 1,2,...,N)$

U حداکثر تعداد ماشین‌آلات مجاز درون هر سلول

K_{ij} تعداد ماشین‌هایی که در مسیر jام قطعه i قرار دارند
$(\forall j = 1,2,...,Q_i \ \forall i = 1,2,...,N)$

T_{ik} زمان پردازش قطعه i روی ماشین kام
$(\forall k = 1,2,...,M \ \forall i = 1,2,...,N)$

E_k ظرفیت ماشین kام $(\forall k = 1,2,...,M)$

$u_{ij}^{(k)}$ اندیس مربوط به kامین ماشین موجود در مسیر jام قطعه i
$(\forall i = 1,2,...,N, \forall k = 1,2,...,M \ \forall j = 1,2,...,Q_i)$

q فاکتور تعیین کننده توازن بار کاری بین ماشین‌آلات

متغیرهای تصمیم

P_{ij} مقداری از تقاضای قطعه i که در مسیر jام تولید می‌شود
$(\forall i = 1,2,...,N \ \forall j = 1,2,...,Q_i ,)$

Y_{kl} متغیر باینری نشان می‌دهد آیا ماشین kام به سلول l تخصیص می‌یابد یا خیر
$(\forall k = 1,2,...,M \ \forall l = 1,2,...,C ,)$

مدل ریاضی پیشنهادی

$$MinZ = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{Q_i} \sum_{k=1}^{K_{ij}-1} \sum_{l=1}^{C} P_{ij} Y_{\left(u_{ij}^{(k)}\right)l} \left(1 - Y_{\left(u_{ij}^{(k+1)}\right)l}\right) \qquad (۱)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^{Q_i} P_{ij} = V_i \qquad \forall i = 1,2,...,N \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{Q_i} P_{ij} T_{i(u_{ij}^{(k)})} \le E_k \qquad \forall k = 1,2,...,M \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{Q_i} P_{ij} T_{ik} \ge \frac{q}{M} \sum_{k=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{Q_i} P_{ij} T_{ik} \qquad \forall k = 1,2,...,M \qquad (۴)$$

$$\sum_{k=1}^{M} Y_{kl} \le U \qquad \forall l = 1,2,...,C \qquad (۵)$$

$$\sum_{l=1}^{C} Y_{kl} = 1 \qquad \forall k = 1,2,...,M \qquad (۶)$$

$$P_{ij} \ge 0 \qquad \forall i = 1,2,...,N, \ \forall j = 1,2,...,Q_i \qquad (۷)$$

$$Y_{kl} \in \{0,1\} \qquad \begin{matrix}\forall\, k= 1,2,\ldots, M,\\ \forall\, l= 1,2,\ldots,C\end{matrix} \qquad (۸)$$

رابطه (۱) مبین تابع هدف مسئله است که نشان دهنده مجموع جابجایی‌های بین سلولی قطعات است. محدودیت (۲) ایجاب می‌کند تقاضای قطعات به طور کامل برآورده شود. محدودیت (۳) تضمین می‌کند بار کاری تحمیل شده به هر ماشین از ظرفیت در دسترس ماشین تجاوز نکند. محدودیت (۴) توازن بار کاری روی ماشین‌آلات را برقرار می‌کند به طوری که $q \in (0,1]$. محدودیت (۵) مربوط به اندازه سلول است. این محدودیت یک حد بالا برای اندازه سلول یعنی حداکثر تعداد ماشین‌آلات درون یک سلول را مشخص می‌کند. محدودیت (۶) این اطمینان را حاصل می‌کند که هر ماشین تنها به یک سلول تخصیص داده شود. محدودیت‌های (۷) و (۸) نیز مربوط به تعریف متغیرهای تصمیم مسئله هستند.

تعداد متغیرها در مدل برابر $M\times C + N\times Q$ و همچنین تعداد محدودیت های مدل پیشنهادی برابر $N + 3M + C$ می‌باشد. با توجه به اینکه مسئله تشکیل سلولی در ساده‌ترین حالت و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های پیچیده جزو مسائل NP-Complete است [۵]، لذا مدل پیشنهادی با توجه به لحاظ کردن با محدودیت‌ها و فاکتورهای تولیدی کاربردی قویا جزو مسائل NP-Complete محسوب می‌شود. می‌باشد. از این رو، در تحقیق حاضر رویکردی ترکیبی متشکل از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای حل مدل ارائه گردیده است.

الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

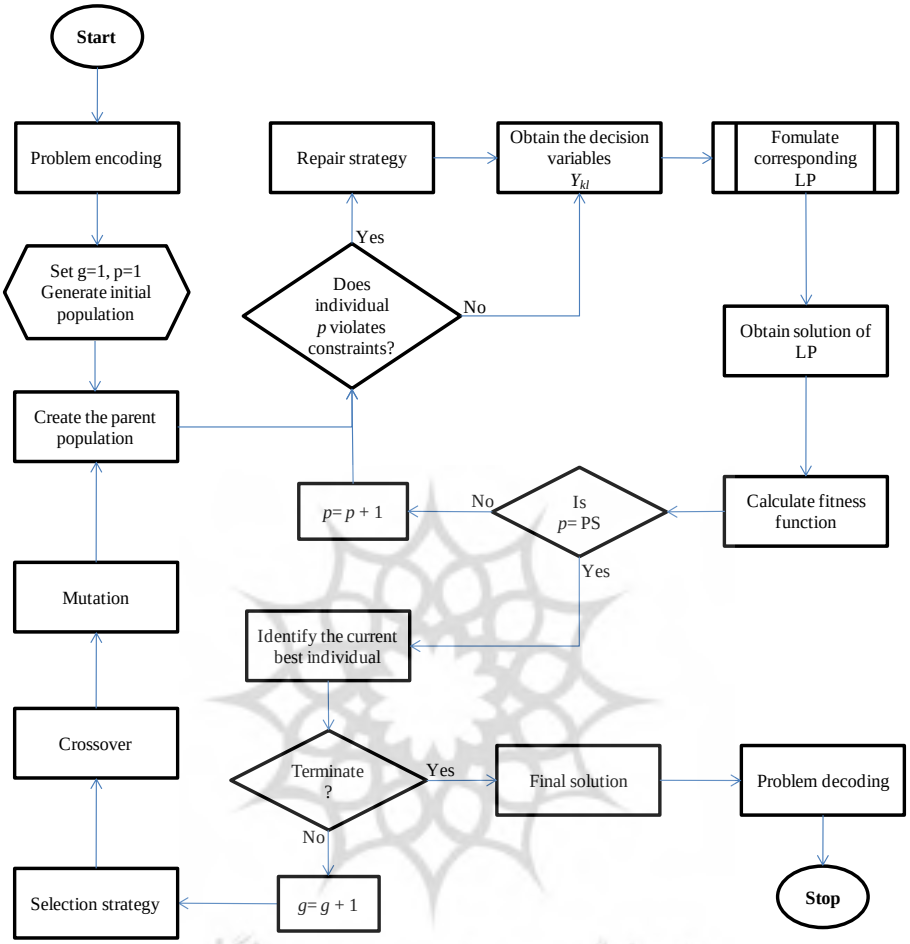
مسئله تشکیل سلولی جزو مسائل بهینه سازی ترکیباتی است و NP-complete به حساب می‌آید [۵]، به این معنی که با افزایش ابعاد مسئله زمان حل مسئله به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند. با توجه به پیچیدگی بالای محاسباتی مدل پیشنهادی از یک الگوریتم ترکیبی برای حل آن استفاده شده است.

الگوریتم پیشنهادی، ترکیبی از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک و الگوریتم دقیق برنامه‌ریزی خطی است. در هر تکرار تخصیص ماشین‌آلات به سلول‌های تولیدی

توسط الگوریتم ژنتیک انجام شده، سپس بر اساس سلول‌های تشکیل شده، مقدار تولید هر قطعه روی هر مسیر توسط زیر مسئله برنامه‌ریزی خطی محاسبه می‌شود. هدف از ترکیب این دو روش بهره‌گیری هم زمان از مزایای روش‌های فرا ابتکاری (زمان محاسباتی قابل قبول) و روشهای محاسباتی دقیق (تضمین بهینگی) بوده است. مدل پیشنهادی شامل متغیرهای باینری برای تخصیص ماشین‌ها به سلول‌ها و همچنین متغیرهای حقیقی به منظور تعیین مقدار تولید هر قطعه در هر مسیر است. در هر تکرار از الگوریتم، GA در فضای گسسته متغیرهای باینری جستجو کرده و ماشین‌آلات را به سلول‌ها تخصیص می‌دهد. با اختصاص ماشین‌ها و تشکیل سلول‌ها، مقدار متغیرهای باینری در مدل تعیین می‌شود. سپس بر اساس سلول‌های تولیدی ایجاد شده توسط GA می‌توان نحوه تخصیص ماشین‌آلات و مقدار متغیرهای باینری را تعیین کرد. با داشتن مقدار متغیرهای باینری، مدل ریاضی غیر خطی پیشنهادی به یک مدل برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای حقیقی کاهش می‌یابد. با حل زیر مسئله برنامه‌ریزی خطی مقدار متغیرهای حقیقی و تابع هدف تعیین می‌شود. ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده است. جزئیات مربوط به هر قسمت در ادامه به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

یکی از مهم ترین مزایای استفاده از برنامه‌ریزی خطی در درون الگوریتم GA، برآوردن محدودیت‌هایی است که در آنها متغیر حقیقی قرار دارد، محدودیت‌هایی که برآوده ساختن آنها با استفاده از الگوریتم ژنتیک بسیار مشکل است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۱. ساختار کلی الگوریتم ترکیبی ارائه شده برای حل مدل پیشنهادی

نمایش کروموزوم

نحوه نمایش متغیرهای تصمیم مسئله، اولین مرحله در اجرای الگوریتم GA در حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد. همان طور که به آن اشاره شد، در این تحقیق از GA به منظور تخصیص ماشین‌آلات به سلول‌های تولیدی و تعیین متغیرهای تصمیم باینری استفاده می‌شود. بنابراین هر کروموزوم چگونگی تشکیل گروه ماشین آلات را نشان می‌دهد که در آن هر ژن مقداری بین ۱ تا C (حداکثر تعداد سلول‌ها) را اختیار می‌کند. موقعیت هر ژن در کروموزوم نشان‌دهنده شماره ماشین و عدد داخل هر ژن شماره سلولی را نشان می‌دهد که ماشین به آن تخصیص یافته است. به طور مثال کروموزوم نمایش داده شده در شکل (۲) نشان می‌دهد ماشین‌های ۱، ۴ و ۷ به سلول ۲، ماشین‌های ۲ و ۳ به سلول ۳ و ماشین‌های ۵ و۶ به سلول ۱ تخصیص یافته‌اند.

	Machines						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Cell number	2	3	3	2	1	1	2

شکل۲. نحوه نمایش کروموزوم

ایجاد جمعیت اولیه

گام دوم در اجرای الگوریتم ایجاد یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها است. جمعیت اولیه تنها یکبار در آغاز الگوریتم ژنتیک به منظور راه اندازی اولیه الگوریتم تولید می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی از یک الگوریتم ابتکاری به منظور تولید جمعیت اولیه استفاده شده به گونه ای که محدودیت‌های مسئله را ارضاء کند. گامهای الگوریتم ابتکاری به صورت زیر می‌باشد:

گام ۱. تصمیم‌گیری درباره تعداد سلول‌های تولیدی (C)

گام ۲. انتخاب C ماشین و تخصیص هر یک از این ماشین‌ها به یک سلول (این گام تضمین می‌نماید که هر سلول تولیدی حداقل می‌بایست شامل یک ماشین باشد.)

گام ۳. گروه‌بندی باقی مانده ماشین‌آلات به صورت تصادفی درون سلول‌ها

گام ۴. گام‌های ۱-۳ تا زمانی که تمامی کروموزوم‌های جمعیت اولیه تولید شوند

تکرار می‌شود.

اجرای زیر مسئله برنامه‌ریزی خطی

براساس هر کروموزوم می‌توان نحوه تخصیص ماشین‌آلات و مقدار متغیرهای باینری را تعیین کرد. با داشتن مقدار متغیرهای باینری، می‌توان به آسانی تعداد جابجایی‌ها را تعیین کرد. همچنین محدودیت‌های مرتبط با تخصیص ماشین‌آلات به سلول‌ها نیز از مدل حذف می‌گردد. بنابراین مدل پیشنهادی به یک مدل برنامه‌ریزی خطی با متغیرهای حقیقی کاهش می‌یابد. با حل زیر مسئله برنامه‌ریزی خطی مقدار متغیرهای حقیقی و تابع هدف تعیین می‌شود. هدف از این زیر مسئله برنامه‌ریزی خطی کمینه سازی جابجایی‌های بین سلولی با توجه به محدودیت‌های برآوردن تقاضای قطعات، برآوردن ظرفیت ماشین‌آلات و برقراری توازن بار کاری روی ماشین‌آلات است.

$$MinZ' = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{Q_i} n_{ij} P_{ij} \qquad (۹)$$

Subject to:

Constrants (2-4) , 7

به طوری که n_{ij} تعداد جابجایی‌های بین سلولی قطعه i در مسیر j ام آن را نشان می‌دهد.

محاسبه تابع برازندگی

هدف از تابع برازندگی، اندازه گیری میزان انطباق هر یک از کروموزوم‌های جمعیت با تابع هدف و محدودیت‌های مدل می‌باشد. از مقدار انطباق حاصل از تابع برازندگی برای انتخاب کروموزوم‌های والد به منظور تولید جمعیت نسل بعدی استفاده می‌شود. در این تحقیق مقدار تابع برآزندگی از مجموع تابع هدف محاسبه شده توسط زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی (رابطه (۹)) و مقدار جریمه تعیین شده

بدست می‌آید. مقدار جریمه برای برآوردن محدودیت مربوط به اندازه سلول (رابطه (۵)) در نظر گرفته می‌شود.

استراتژی انتخاب

هدف از مرحله انتخاب تضمین این است که کروموزوم‌های با میزان مطلوبیت بیشتر به منظور رعایت قاعده بقای مناسب‌ترین‌ها، شانس بیشتری برای تولید جمعیت نسل بعدی داشته باشند. در این مرحله به هر کروموزوم بر اساس تابع برآزندگی و استراتژی انتخاب یک مقدار احتمال تعلق می‌گیرد. مقدار احتمال طوری تعیین می‌شود که کروموزوم‌های با انطباق بیشتر شانس بالاتری برای انتخاب شدن داشته باشند. در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از استراتژی رولت ویل نخبه گرای مبتنی بر رتبه‌بندی ارائه شده توسط تاناکیج و هیکس برای انتخاب کروموزوم‌های والد استفاده شده است [۱۸].

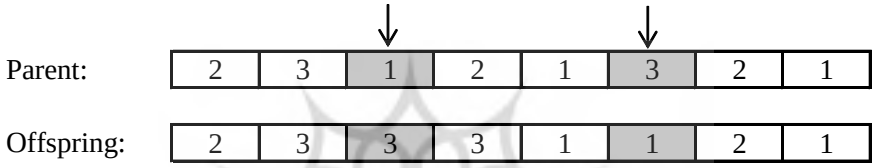
عملگرهای تقاطع و جهش

عملگر تقاطع با ترکیب و تعویض اطلاعات در کروموزوم‌های والد سعی در ایجاد نسل جدیدی شبیه به والدین دارد. در الگوریتم پیشنهادی از عملگر تقاطع ساده استفاده شده است. در این عملگر یک نقطه تصادفی در طول کروموزوم انتخاب شده، سپس قسمت سمت راست در دو کروموزوم والد با هم تعویض می‌شود. عملگر تقاطع با احتمال (p_c) در الگوریتم انجام می‌شود. شکل (۳) نحوه به کارگیری عملگر تقاطعی ساده را در قالب یک مثال نشان می‌دهد.

	← Machines →					← Part Routes →							
Parent 1:	2	3	1	2	1	2	3	1	4	2	1	2	3
Parent 2:	1	2	1	3	2	2	1	4	4	1	3	1	3
Offspring 1:	2	3	1	3	2	2	3	1	4	1	3	1	3
Offspring 2:	1	2	1	2	1	2	1	4	4	2	1	2	3

شکل ۳. نمایش چگونگی انجام عملگر تقاطع ساده

عملگر جهش روی یک کروموزوم و به منظور ایجاد تغییر در کروموزوم والد انجام می‌شود که این امر سبب جستجوی بهتر در فضای حل می‌شود. معمولاً به منظور بهبود کارایی و سرعت هم گرایی الگوریتم مقدار احتمال عملگر جهش (P_m) بسیار کوچک در نظر گرفته می‌شود. در الگوریتم ارائه شده در این تحقیق از عملگر معاوضه[1] به عنوان عملگر جهش استفاده شده است. عملگر جهش معاوضه دو ماشین را به تصادف انتخاب کرده و نحوه تخصیص دو ماشین به سلول‌ها را با هم تعویض می‌کند. به طور مثال، شکل (۴) نشان می‌دهد که ماشین‌های ۳ و ۶ به تصادف انتخاب شده‌اند و جای این دو ماشین در سلول‌های ۱ و ۳ با هم تعویض می‌شود.



شکل ٤. نمایش چگونگی انجام عملگر جهش معاوضه

شرط توقف

تولید نسل جدید در الگوریتم ژنتیک تا زمانی که شرط یا شرایط توقف برآورده شود ادامه پیدا می‌کند. در این تحقیق از دو معیار به عنوان شرط توقف استفاده شده است. اولین شرط توقف میزان بهبود در تابع مطلوبیت را از یک نسل به نسل بعدی کنترل می‌کند. اگر در یک تعداد معین تکرار متوالی، هیچ بهبودی در تابع مطلوبیت بهترین جواب حاصل نشود الگوریتم متوقف می‌شود. دومین معیار توقف استفاده شده در الگوریتم حداکثر تکرار تولید نسل است. هر زمان یکی از دو معیار بیان شده برآورده شود، الگوریتم متوقف می‌شود.

مثال عددی

به منظور نشان دادن کارایی رویکرد و الگوریتم حل ترکیبی ارائه شده، در ابتدا از مثال عددی ارائه شده توسط کیم و همکاران استفاده شده است. مثال عددی مورد

1. Swap

استفاده توسط کیم و همکاران شامل ۱۰ ماشین، ۱۰ قطعه، ۲۵ مسیر تولیدی مختلف و حداکثر تعداد مجاز ماشین‌آلات درون یک سلول محدود به عدد ۵ می‌باشد [۸]. الگوریتم ترکیبی ارائه شده در این تحقیق با استفاده از نرم افزار MATLAB نسخه ۷,۶ برنامه‌نویسی شده است. برنامه‌های کامپیوتری بر روی رایانه شخصی با پردازشگر Intel Core 2 و ۲ گیگابایت حافظه اجرا شده‌اند. مقادیر استفاده شده برای پارامترهای به کارگرفته شده در الگوریتم ژنتیک بر اساس آزمایش ها، در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱. مقدار پارامترهای استفاده شده در آزمایش ها

پارامترهای الگوریتم	مقدار پارامترها
اندازه جمعیت (pop_size)	۲۰۰
احتمال عملگر تقاطع (p_c)	٪۸۰
احتمال عملگر جهش (P_m)	٪۲۰
حداکثر تکرار تولید نسل	۱۰۰
حداکثر تکرار تولید نسل بدون بهبود	۱۰

نتایج حاصل از حل مثال عددی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی با نتایج بدست از دو الگوریتم موجود در ادبیات مقایسه شده است. این دو الگوریتم عبارتند از (i) الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط [۲۴] (ii) الگوریتم ابتکاری دو مرحله‌ای ارائه شده توسط [۸]. مفروضات و عوامل تولیدی در نظر گرفته شده در این مقالات مشابه مسئله ارائه شده در این تحقیق است، با این تفاوت که در این تحقیقات فرض شده که از میان مسیرهای تولید موجود تنها یک مسیر انتخاب می‌شود.

نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که مقدار $q = 0.9$ مقدار تابع هدف بهتری را برای الگوریتم بدست می‌دهد. نتایج محاسباتی حاصل از مقایسات الگوریتم ترکیبی با الگوریتم‌های موجود در ادبیات در جدول (۲) خلاصه شده است. همان طور که در این جدول ملاحظه می‌شود استفاده از رویکرد ارائه شده برای در نظر گرفتن چند مسیر تولیدی بصورت هم زمان باعث بهبود قابل توجهی در تابع هدف شده است.

به علاوه، آزمایش‌ها به ازای مقادیر مختلف q نیز انجام شده است که نتایج آن در جدول (۳) خلاصه شده است. همان طور که در جدول قابل ملاحظه است، با افزایش مقدار پارامتر q تعداد جابجایی‌های بین سلولی افزایش می‌یابد. این افزایش بدین دلیل است که با افزایش مقدار q، الگوریتم به منظور ایجاد توازن بار کاری در سطحی بالاتر، حجم تقاضای قطعات را روی مسیرهای تولیدی بیشتری توزیع می‌کند که این امر باعث افزایش جابجایی‌ها در سیستم می‌شود.

جدول ۲. نتایج حاصل از مقایسه رویکرد پیشنهادی با رویکرد موجود در ادبیات

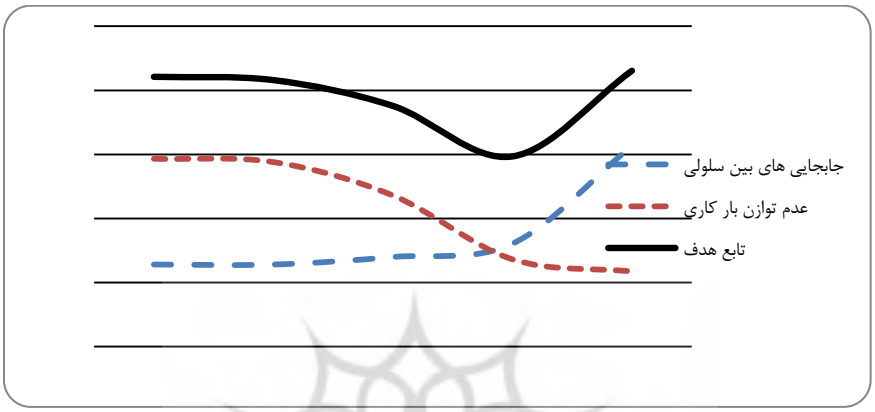
روش	تعداد جابجایی های بین سلولی	میزان عدم توازن بار کاری	مجموع
روش ابتکاری پیشنهادی توسط کیم و همکاران [۸]	۸۸	۱۱۸	۲۰۶
الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توسط ژائو و وو [۲٤]	۸۲	۱۱۲	۱۹٤
الگوریتم ترکیبی ارائه شده در این مقاله	۸۰/۲۹	٦۸/۰۹	۱٤۸/۳۸

براساس نتایج نمایش داده شده در جدول (۳)، شکل (۵) افزایش جابجایی‌ها و کاهش عدم توازن بار کاری حاصل را به ازای سطوح مختلفی از توازن بار کاری نشان می‌دهد. همان طورکه در شکل قابل ملاحظه است، با افزایش مقدار q عدم توازن بار کاری روی ماشین‌آلات کاهش و در نقطه مقابل تعداد جابجایی‌های بین سلولی افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۳. نتایج حاصل از الگوریتم به ازای مقادیر مختلف پارامتر q

مقدار پارامتر q	تعداد جابجایی های بین سلولی	میزان عدم توازن بار کاری	مجموع
۰/٦	٦٤	۱٤٦/٥٤	۲۱۰/٥٤
۰/۷	٦٤	۱٤۳/۹٦	۲۰۷/۹٦
۰/۸	٦۹/۹	۱۱۷/۹۲	۱۸۷/۸۲
۰/۹	۸۰/۲۰	٦۸/۰۹	۱٤۸/۳۸
۱	۱٥٦/٦٥	٥۸/٥۹	۲۱٥/۲٤

رویکرد پیشنهادی با به کارگیری و امکان استفاده از تمامی مسیرهای تولیدی باعث افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی سلول‌های تولیدی شده که در نتیجه امکان بدست آوردن جواب‌های بهتر را فراهم می‌کند.



شکل ۵. تغییر مقدار تابع هدف به ازای مقادیر مختلف پارامتر *q*

نتایج محاسباتی

به منظور انجام آزمایش‌ها بیشتر، الگوریتم ترکیبی پیشنهادی روی ۱۰ نمونه مسئله استفاده شده توسط کیم و همکاران آزمون شده و نتایج آن با الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط [۲۴] و الگوریتم ابتکاری پیشنهادی توسط [۸] مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابعاد این مسائل در جدول (۴) نشان داده شده است.

جدول ٤. ابعاد مسائل نمونه مورد بررسی

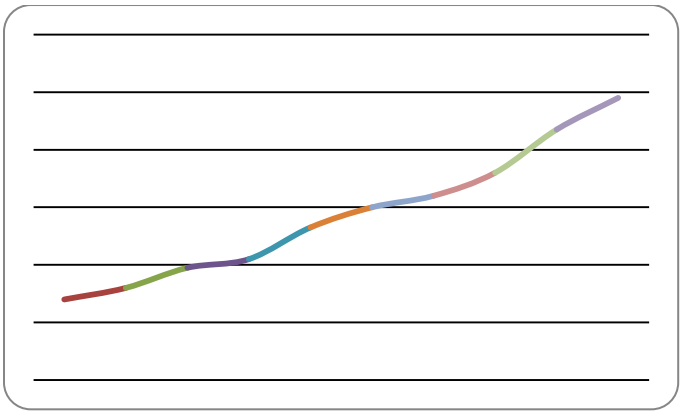
	شماره مسئله									
	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰
تعداد ماشین آلات	۱۰	۱۰	۱۰	۱۲	۱۲	۱۵	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
تعداد قطعات	۱۰	۱۲	۱۵	۱۲	۱۵	۲۰	۲۴	۳۰	۴۰	۵۰
تعداد مسیرهای تولیدی	۲۵	۳۰	۳۶	۳۰	۳۶	۵۴	۶۱	۷۵	۱۰۰	۱۲۰

جدول ۵ مقادیر میانگین تعداد جابجایی‌های بین سلولی، بیشینه عدم توازن بارکاری و مجموع این دو مقدار را به عنوان تابع هدف برای ۱۰ مسئله نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده در جدول ۳ نشان می‌دهد رویکرد پیشنهادی به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری در طراحی سیستم تولیدی، سلول‌های تولیدی با جابجایی بین سلول کمتر و همچنین بار کاری بسیار متوازن‌تر نسبت به دو روش دیگر ایجاد می‌کند.

جدول ۵. مقایسه میانگین جواب‌های حاصل از الگوریتم پیشنهادی روی ۱۰ مسئله نمونه

	روش ابتکاری پیشنهادی توسط کیم و همکاران [۸]	الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توسط ژائو و همکاران [۲٤]	الگوریتم ترکیبی ارائه شده در این مقاله
تعداد جابجایی های بین سلولی	٤۲/۸	۱۱۷/۵	۳۵/٦
میزان عدم توازن بار کاری	۱٤٤/۳	۱۰۵/۵	۹۷/۳
مقدار تابع هدف	۱۸۷/۱	۲۲۳	۱۳۲/۹

از نظر زمان محاسباتی، الگوریتم ابتکاری دو مرحله ای ارائه شده توسط کیم و همکاران نسبت به دو روش دیگر برتری دارد. میانگین زمان محاسباتی لازم برای اجرای این الگوریتم برابر ۲ ثانیه است. الگوریتم ژنتیک [۲۴] دارای میانگین زمان محاسباتی ۵۵۱ ثانیه و الگوریتم ترکیبی پیشنهادی دارای میانگین زمانی ۵۷ ثانیه برای حل مسائل می‌باشد. اگرچه این زمان نسبت به الگوریتم ابتکاری زمان زیادی می‌باشد، ولی زمانی کاملاً منطقی برای حل مسائل در ابعاد بزرگ به حساب می‌آید. منحنی زمان محاسباتی لازم برای حل این مسئله با استفاده از الگوریتم پیشنهادی در شکل (۶) ترسیم شده است.



شکل ٦. منحنی زمان محاسباتی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی

با این وجود، الگوریتم ترکیبی ارائه شده در این مقاله، جواب‌هایی را با مقدار بهتر هم از نظر تعداد جابجایی‌های بین سلولی و هم از نظر توازن بار کاری ماشین‌آلات تولید می‌کند. همان طور که از جدول (۳) ملاحظه می‌شود، الگوریتم پیشنهادی بهبود ۴۰٪ را نسبت به بهترین جواب حاصل از این دو الگوریتم دارد. نتایج نشان می‌دهد رویکرد ارائه شده برای در نظر گرفتن چندین مسیر تولیدی به صورت هم زمان و همچنین الگوریتم ترکیبی پیشنهادی دارای قابلیت بالا در حل مسائل تشکیل سلولی در حالت وجود مسیرهای تولید جایگزین در زمان محاسباتی قابل قبول است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق مسئله تشکیل سلولی با وجود مسیرهای جایگزین با رویکردی جدید در حالی که امکان تولید روی بیش از یک مسیرتولیدی وجود دارد در نظر گرفته شد. این مسئله به صورت یک مدل ریاضی غیر خطی فرمول‌بندی شد به طوری که مدل علاوه بر تشکیل سلول‌های ماشینی قابلیت تعیین مقدار تولید هر قطعه روی هر مسیر را نیز دارد. بر اساس مدل پیشنهادی، سلول‌های تولیدی با در نظر گرفتن چندین فاکتور مهم تولیدی از جمله توالی عملیات، زمان پردازش و ظرفیت ماشین‌آلات طراحی می‌شوند. همچنین مدل قابلیت ایجاد توازن بار کاری روی

ماشین‌ها را نیز دارد. برقراری توازن بار کاری روی ماشین‌الات به صورت یک محدودیت خطی در مدل لحاظ شده است. با توجه به پیچیدگی محاسباتی مدل پیشنهادی، از یک الگوریتم ترکیبی ابتکاری به منظور حل آن ارائه شد.

در هر تکرار، الگوریتم ژنتیک در فضای حل جستجو کرده و با توجه به تابع هدف، تخصیص ماشین‌آلات به سلول‌ها را انجام می‌دهد. بعد از تخصیص ماشین‌آلات و تعیین سلول‌های تولیدی، مدل ریاضی به یک مدل خطی با متغیرهای حقیقی کاهش می‌یابد که به آسانی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی قابل حل است. بنابراین مقدار متغیرهای حقیقی و تابع هدف بر اساس برنامه‌ریزی خطی محاسبه می‌شود. الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با استفاده از یک مثال عددی و ۱۰ مسئله نمونه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل شد. نتایج حاصل از الگوریتم با دو الگوریتم موجود در ادبیات مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج محاسباتی کارایی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی در یافتن جواب و همچنین برتری رویکرد پیشنهادی نسبت به رویکرهای پیشین که تنها یک مسیر را از میان مسیرهای تولیدی انتخاب می‌کردند را نشان می‌دهد. با توجه به روند رو به رشد استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی در حل مسائل بهینه سازی ترکیباتی، استفاده از الگوریتم ترکیبی ارائه شده در این تحقیق در سایر مسائل بهینه سازی می‌تواند به عنوان زمینه مناسبی برای تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

منابع

1. Adenso-Diaz, B., Lozano, S., Racero, J., and Guerrero, F., **Machine cell formation in generalized group technology**. *Computers and Industrial engineering*, 41, 2001, 227-240.
2. Akturk, M.S., and Turkcan, A., **Cellular manufacturing system design using a holonistic approach**. *International Journal of Production Research*, 38, 2000, 2327-2347.
3. Bajestani, M.A., Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A.R., and Baharian Khoshkhou, G., **A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem**. *Computers and Operations Research*, 36, 2009, 777-794.
4. Caux, C., Bruniaux, R., and Pierreval, H., **Cell formation with alternative process plans and machine capacity constraints: A new combined approach**. *International Journal of Production Economics*, 64, 2000, 279-284.
5. Dimopoulos, C., and Zalzala, A.M., **Recent developments in evolutionary computation for manufacturing optimization: problems, solutions, and comparison**. *IIE Transactions on Evolutionary Computation*, 4, 2000, 93-113.
6. Hwang, H., and Ree, P., **Routes selection for the cell formation problem with alternate part process plan**. *Computers and Industrial Engineering*, 30, 1996, 423-431.
7. Jensen, J.B., Malhotra, M.K., and Philipoom, P.R., **Machine dedication and process flexibility in a group technology enviromen**t. *Journal of Operations Management*, 14, 1996, 19-39.
8. Kim, C.O., Baek, J.G., and Baed, J.K., **A two-phase heuristic algorithm for cell formation problems considering alternative part routes and machine sequences**. *International Journal of Production Research*, 18, 2004, 3911-3927.
9. Morris, J.S., and Tersine, R.J., **A simulation analysis of factors influencing the attractiveness of group technology layouts**. *Management Science*, 36, 1990, 1567-1578.
10. Nair, G.J., and Narendran, T.T., **Case: A clustering algorithm for cell formation with sequence data**. *International Journal of Production Research*, 36, 1998, 157-179.
11. Papaioannou, G., and Wilson, J.M., **The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997-2008): Review and directions for future research**. *European Journal of Operational Research*, Article in press (2009): doi:10.1016/j.ejor.2009.10.020.

12. Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., and Jabal-Ameli, M.S., **A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system**. *European Journal of Operational Research*, 185, 2008, 563-592.
13. Sarker, B.R., and Li, Z., **Measuring matrix-based cell formation with alternative routings**. *Journal of Operational research Society*, 49, 1998, 953-965.
14. Selim, H. M., Askin, R. G. and Vakharia, A. J., **Cell formation in group technology: review, evaluation and direction for future research**. *Computers and Industrial Engineering*, 34, 1998, 3-20.
15. Singh, N., **Design of cellular manufacturing systems: an invited review**. *European Journal of Operational Research*, 69, 1993, 284-291.
16. Spiliopoulos, K., and Sofianopoulou, S., **Manufacturing cell design with alternative routings in generalized group technology: reducing the complexity of the solution space**. *International Journal of Production Research*, 6, 2007, 1355-1367.
17. Suresh, N.C., and Slomp, J., **A multi-objective procedure for labour assignment and grouping in capacitated cell formation problems**. *International Journal of Production Research*, 39, 2001, 4103-4131.
18. Tunnukij, T., and Hicks, C., **An Enhanced Grouping Genetic Algorithm for solving the cell formation problem**. *International Journal of Production Research*, 7, 2009, 1989˚2007.
19. Wemmerlov, U., and Johnson, D.J., **Cellular manufacturing at 46 user plants: Implementation experiences and Performance Improvements**. *International Journal of Production Research*, 35, 1997, 29-49.
20. Won, Y., and Lee, K., **Group technology cell formation considering machine sequences and production volumes**. *International Journal of Production Research*, 39, 2001, 2755-2768.
21. Wu, .N., and Salvendy, G., **A modified network approach for the design of cellular manufacturing systems**. *International Journal of Production Research*, 35, 1993, 29-49.
22. Wu, T.H., chen, J.F., and Yeh, J.Y., **A decomposition approach to the cell formation problem with alternative process plans**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24, 2004, 834-840.
23. Yin, Y., and Yasuda, K., **Manufacturing cells design in considaration of various production factors**. *International Journal of Production Research*, 40, 2002, 885-906.
24. Zhao, C., and Wu, Z., **A genetic algorithm for manufacturing cell formation with multiple routes and multiple objectives**. *International Journal of Production Research*, 38, 2000, 385˚395.